

بررسی تاثیر پارامترهای کلیدی در عملکرد لرزه ای ستون های بتن مسلح مقاوم سازی شده به روش نزدیک سطح

محمد کاظم شربتدار

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهدی علیزاده نوذری

دانشجوی دکتری سازه دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

عهدہ دار مکاتبات: msharbatdar@semnan.ac.ir

چکیده

در مطالعه‌ی حاضر، یک روش مقاوم‌سازی براساس مدفون کردن نوارهای پلیمری کربنی چسبیده در نزدیک سطح در پوشش بتن به منظور بهبود ظرفیت خمشی ستون‌ها ناشی از بارهای جانبی رفت و برگشتی استفاده شده است. در این روش، از بروز پدیده جدا شدن جلوگیری شده که قادر به استفاده از ظرفیت کامل نوار است و همچنین حفاظت بالاتر در برابر آتش سوزی فراهم می‌شود. از روش المان محدود جهت مشاهده و بررسی رفتار خمشی ستون بتنی تقویت شده با روش نزدیک سطح استفاده شده است. بدین منظور از مدل‌های رفتاری بتن و فولاد چند خطی در نرم‌افزار اپنسیس استفاده شدند و پس از اعتبارسنجی، نتیجه‌ی مدل‌سازی با نتایج تجربی آزمایشگاهی تطبیق بسیار خوبی داشتند. پارامترهای مدل‌سازی مانند قطر میلگرد مدفون، مقاومت فشاری بتن و تعداد نوارهای پلیمری در ساخت مدل‌های عددی در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌های تقویت شده تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی نشان داد که افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری ستون‌ها با استفاده از روش بکاربردن المان در نزدیک سطح در حالت‌های مختلف بدست می‌آید. نتایج عددی با نتایج مطالعه تحلیلی براساس سازگاری کرنش مقایسه شد که تطبیق قابل قبولی بین دو نتایج مشاهده شد. واژگان کلیدی: روش نزدیک سطح، ستون بتن مسلح، نوار پلیمری کربن، ظرفیت خمشی

تا سه دهه‌ی اخیر بارگذاری لرزه‌ای در طراحی ساختمان‌های بتنی مسلح بطور جدی در نظر گرفته نمی‌شد یا حتی زمانی که منظور می‌شد، نتایج جزئیات آرماتورگذاری نمی‌توانست مقررات و آیین‌نامه‌های اخیر سازه‌ای را ارضا کند. بنا به این دلیل، امکان خسارت قابل توجهی در سازه‌های قدیمی حتی با بارهای لرزه‌ای با شدت متوسط وجود داشت. در بیشتر موارد، ستون‌ها بیانگر اعضای آسیب‌پذیری هستند که در زلزله با شکست آن‌ها ممکن است کل سازه دچار ریزش و سقوط شود. در آغاز دهه‌ی ۹۰ میلادی مواد معمولی جهت تقویت ستون‌های بتنی مسلح استفاده می‌شد و بتدریج این مصالح با الیاف‌های پلیمری کربن^۱ و شیشه^۲ تقویت شده جایگزین شدند. مزایای استفاده از این مواد کامپوزیت، مقاومت کششی بالا، وزن واحد حجم پایین‌تر نسبت به مصالح مرسوم فولاد و بتن، مقاومت بالا در برابر شرایط زیست محیطی، دوام و سهولت کاربرد آن‌ها می‌باشند [۱و۲].

روش‌های متعددی برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتن آرمه وجود دارد که از مصالح سنتی مانند ورق یا نبشی فولادی تا روش‌هایی با مصالح نوین سبک پلیمری با الیاف مسلح پلیمری بصورت کربن یا شیشه استفاده می‌شود. این مصالح نوین بصورت ورق یا میلگرد یا نوار در بازار وجود دارد و به تناسب روش مورد نظر بصورت تکی یا ترکیبی برای روش‌های مقاوم‌سازی بکار می‌رود. یکی از روش‌های جدید مقاوم‌سازی استفاده از روش میله‌ها یا نوارهای نصب شده‌ی مدفون در نزدیکی سطح^۳ می‌باشد که دارای تاثیر زیاد در افزایش ظرفیت خمشی و برشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده می‌باشد. در این روش مقاوم‌سازی، از نوارهای الیاف پلیمری کربن تقویت شده به داخل شکاف باز در پوشش بتن، استفاده شده است که این عمل برای افزایش مقاومت خمشی ستون در مقابل شکست ناشی از لنگر خمشی می‌باشد. در این روش فضای بین نوار پلیمری و بتن با استفاده از پرکننده‌ای برای انتقال تنش‌ها بین نوار یا میلگرد پلیمری و بتن، پر می‌شود. معمول‌ترین و بهترین پرکننده‌ی شیار از دیدگاه عملکرد، اپوکسی دو مولفه‌ای است. اپوکسی با گرانیوی کم می‌تواند برای تقویت در نواحی با لنگر منفی انتخاب شود. زیرا اپوکسی می‌تواند به داخل شیار ریخته شود. وارن [۳] بیان می‌دارد که افزودن شن و ماسه به اپوکسی موجب افزایش حجم، کنترل گرانیوی، کاهش ضریب انبساط حرارتی و افزایش دمای انتقال شیشه‌ای شدن می‌شود. این افزایش باعث کاهش چسبندگی در سطح واسط میلگرد-اپوکسی برای میلگردهای ساده می‌شود. اخیراً استفاده از خمیر سیمان یا ملات به جای اپوکسی به عنوان پرکننده‌ی شیار به منظور کاهش هزینه‌های مصالح، کاهش آسیب‌های احتمالی وارده به کارگران، به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی، امکان اتصال موثر به لایه‌های مرطوب، دستیابی به مقاومت بهتر در برابر درجه حرارت بالا و بهبود سازگاری حرارتی با لایه‌ی بتن بررسی شده است [۴و۵].

اولیووا و بیلکیک [۶] رفتار ستون‌های بتنی مقاوم‌سازی شده با بکار بردن نوارهای پلیمری کربنی در نزدیک سطح را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و دریافتند زمانی که رفتار خمشی بر نمونه غالب باشد، این روش می‌تواند موثر عمل کند. همچنین استفاده از میلگرد یا نوارهای پلیمری در نزدیک سطح عضو بتنی نسبت به محصور کردن کامل عضو بتنی با ورق‌های پلیمری در برابر آتش عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد و به سازه در تحمل بارهای اضافی کمک شایانی می‌کند [۷]. در تحقیق‌هایی دیگر از ترکیب دو روش بکار بردن ورق‌های پلیمری در وجه بیرونی برای محصور کنندگی عضو بتنی و نوارهای پلیمری در نزدیک سطح جهت بهبود مقاومت فشاری و شکل‌پذیری نمونه‌ها استفاده شد [۸و۹].

۱ Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

۲ Glass Fiber Reinforce Polymer (GFRP)

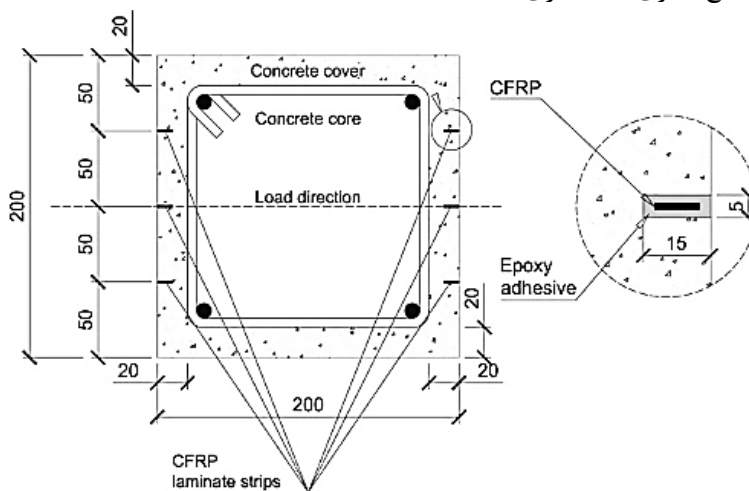
۳ Near Surface Mounted (NSM)

کارهای آزمایشگاهی متعددی در سال‌های اخیر برای کاربرد مصالح نوین پلیمری بخصوص با روش نزدیک سطح برای تقویت تیرها با میلگرد یا نوارهای باریک انجام شده است که تعداد تحقیق‌های صورت گرفته در ارتباط با کاربرد این روش در بررسی رفتار خمشی و محوری ستون اندک می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات قابل توجهی با هدف مدل‌سازی رفتار ستون‌های بتنی ناشی از بارهای رفت و برگشتی انجام گرفته است و ضمناً بررسی جامعی از مدل و روش‌های المان محدود مناسب نیز ارائه شدند [۱۰]. در اکثر روش‌های مرسوم ستون‌های بتن مسلح را با المان‌های محدود و المان‌های سه بعدی حجمی یا با المان‌های تیر تیموشنکو شبیه‌سازی نمودند. زمانی که از المان‌های سه بعدی استفاده می‌شود می‌توان هم المان‌های ستون و آرماتورها را مدل نمود. در مواردی که از المان تیر تیموشنکو برای هر مقطع استفاده شود، تنها می‌توان بتن را مدل نمود و از در نظر گرفتن آرماتورها باید صرف‌نظر نمود [۱۱].

مدل‌های براساس المان‌های حجمی سه بعدی بسیار مناسب‌تر از روش دیگر جهت بررسی رفتار ستون‌های بتن مسلح تحت هر نوع بارگذاری مانند نیروهای برشی و پیچشی می‌باشند. تیر تیموشنکو کمتر در مدل‌سازی استفاده می‌شود اما باید گفت که این نوع برای مدل‌سازی ستون‌ها تحت بارگذاری محوری و نیروهای خمشی مناسب هستند. لذا در مطالعه‌ی حاضر، تاثیر روش بکاربردن نوارهای پلیمری در نزدیک سطح در مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی به وسیله‌ی روش‌های المان محدود و اعتبارسنجی با مدل آزمایشگاهی ارزیابی می‌شود. بحث جدید و ابتکارانه در این موضوع، بررسی رفتار ستون‌های ضعیف از نظر مقاومت فشاری بتن است که در آن نمونه‌ها با میلگردهای فولادی مختلف تحت بار ثابت ثقیلی و بار رفت و برگشتی جانبی قرار دارند.

۲- مدل‌سازی و اعتبارسنجی المان محدود

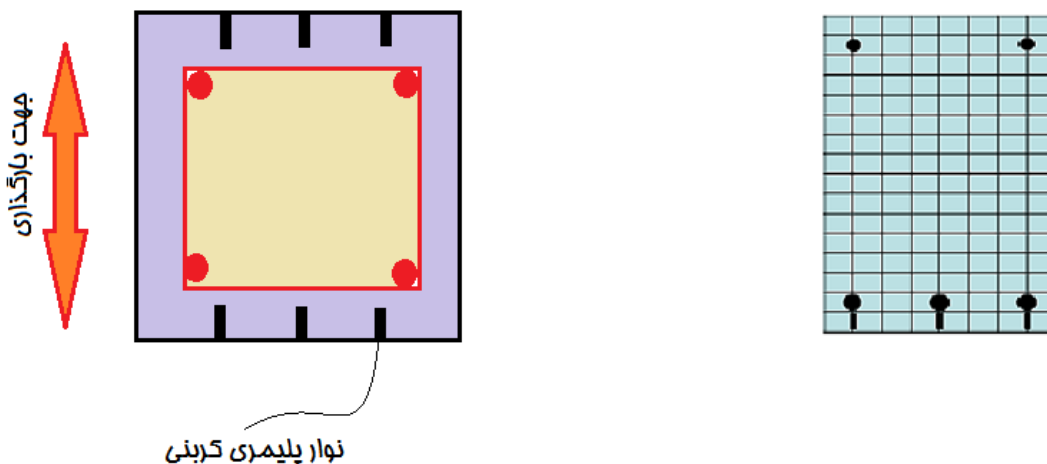
در مطالعه‌ی حاضر، آنالیز و بررسی رفتار ستون بتنی به ارتفاع ۱۰۰۰ میلیمتر با استفاده از نرم افزار اپنسیس بر پایه‌ی کار آزمایشگاهی انجام شده توسط باروش و همکاران [۱۲] انجام گرفته است. مدل آزمایشگاهی که بصورت عددی آنالیز شده در شکل (۱) نشان داده شده است. در مدل‌سازی برنامه موردنظر از ۵ گره و ۴ المان بهره گرفته شد. این المان‌ها از نوع المان‌های تیر- ستون بر پایه‌ی تغییر شکل هستند که همگرایی بالایی دارند و به عنوان مدل فیبری استفاده می‌شود. برای هر المان ۵ نقطه‌ی انتگرال‌گیری بطور مساوی انتخاب شده است. سطح مقطع المان با استفاده از مدل مقطع فیبری شبیه‌سازی شده‌اند.



شکل ۱- سطح مقطع مدل مورد نظر در روش نزدیک سطح برای مقاوم‌سازی ستون (ابعاد به میلیمتر)

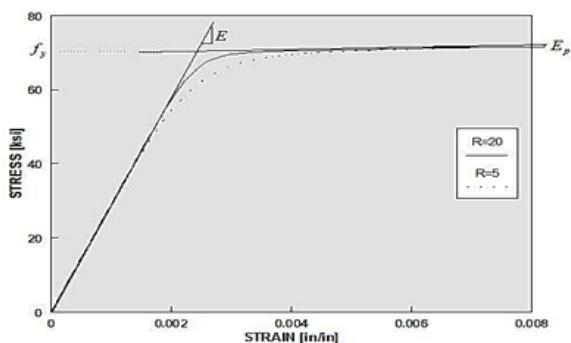
در این مدل، بتن همانند شکل ۲ به هشت بخش مساوی در جهت عرضی و ۱۶ بخش یکسان در راستای طولی تقسیم شده است. میلگردهای طولی و نوارهای پلیمری کربنی با شرایط یکسان هر نمونه مدل شده‌اند. مدل‌های تک بعدی بتن، میلگرد و نوار پلیمری کربنی بکار رفته در مدل مقطع فیبری در اشکال ۳ تا ۵ آمده است. یک شیء

مقطع فیبری از شیء های فیبری ساخته می شود و دارای یک پیکربندی هندسی عمومی که از زیر قسمت های ساده تر و کوچک تر با شکل های منظم تر مثل مستطیل و دایره و مثلث تشکیل شده است که به آن ها پتچ یا وصله می گویند. همچنین یکسری لایه ها مثل میلگردهای مسلح کننده را هم می توان مشخص کرد. از زیر دستوره های لایه و پتچ برای گسسته سازی، کوچک سازی و تبدیل مقطع به فیبر استفاده می شود. با این وجود، با دستور فیبر می توان فیبرها را به صورت تکی و مستقل هم ایجاد کرد. رابطه تیر برنولی هم توسط اضافه کردن شیء مواد تک محوری به فیبرها در نظر گرفته می شود. در واقع در مقاطع فایبر، مقطع به قسمت های کوچک تر تقسیم می شود و برآیند رفتار مقطع با انتگرال گیری از پاسخ تنش- کرنش مواد بدست می آید.

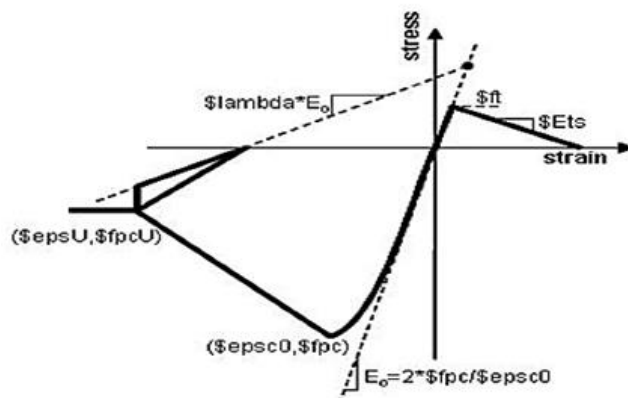


نوار پلیمری کربنی

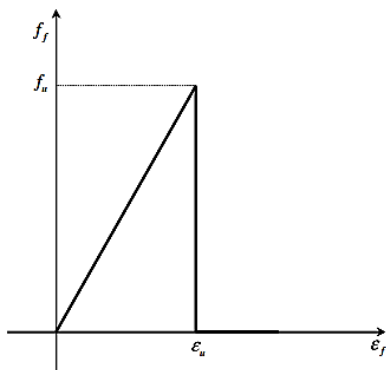
شکل ۲- سطح مقطع فیبری و نحوه ی آرایش نوارهای پلیمری کربنی



شکل ۴- مدل رفتاری فولاد Steel02



شکل ۳- مدل رفتاری بتن Concrete02



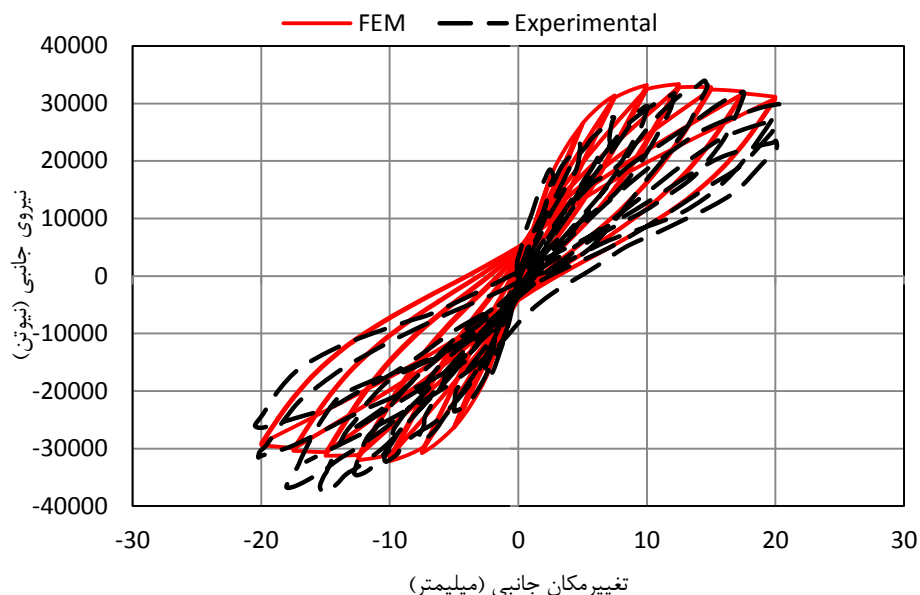
شکل ۵- مدل رفتاری مصالح پلیمری کربنی

جهت مدل‌سازی رفتار بتن از مدل Concrete02 در اپنسیس [۱۳] استفاده شده است. رفتار کششی بتن در این مدل بصورت نرم‌شوندگی کششی خطی در نظر گرفته می‌شود. این دستور یک شیء ماده تک محوری بتنی ایجاد می‌کند که تنش مقاوم کششی برای آن تعریف می‌شود. برای میلگردهای ستون بتنی از مدل Steel02 همانند آنچه در شکل ۴ نشان داده شده است، استفاده شده است. این مدل براساس مدل پیشنهادی منگوتو و پینتو [۱۴] ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، نوار CFRP با ترکیبی از مدل‌های uniaxialMaterial و MinMaxMaterial در اپنسیس به منظور داشتن رفتار ترد الاستیک در ناحیه‌ی کششی صفر می‌باشد. پیوستگی بین نوار پلیمری کربنی و بتن بصورت پیوستگی کامل و بدون لغزش در نظر گرفته می‌شود.

بتن مورد نظر دارای چگالی ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۱۶/۷ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۲/۶۲ مگاپاسکال می‌باشد. مدول الاستیسیته‌ی بتن برابر با ۱۹۲۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون برابر با ۰/۲ اختیار شده است. دلیل انتخاب مقاومت فشاری پایین بتن این است که اکثر مطالعات صورت گرفته در مورد بتن‌های با مقاومت معمولی است و کمتر مطالعه‌ای بر روی ستون‌های با نقص در مقاومت فشاری و کششی بتن انجام گرفته است. در ستون مورد نظر از چهار میلگرد به قطر ۱۰ میلیمتر با درصد آرماتور ۰/۷۹ درصد (کمتر از حد می‌نیم ۱٪ آئین‌نامه) و پوشش بتن ۲۰ میلیمتر استفاده شده است. تنش تسلیم و تنش نهایی و مدول الاستیسیته‌ی میلگرد بکار رفته در مدل‌سازی به ترتیب ۳/۳۲۲، ۵/۴۵۶ و ۲۱۶۹۰۰ مگاپاسکال می‌باشند.

آنالیز غیرخطی المان محدود با استفاده از روش کنترل تغییرمکان با الگوریتم حل نیوتن-رافسون انجام می‌شود. آنالیزها با افزایش و کاهش تغییرمکان بصورت رفت و برگشتی با نرخ افزایشی ۰/۱۵ میلیمتر بر ثانیه در انتهای ستون مربعی با بعد ۲۰۰ میلیمتر اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که نیروی عمودی محوری ثابتی برابر با ۱۵۰ کیلونیوتن نیز به بالای ستون وارد می‌شود.

مقایسه‌ی نتایج منحنی نیرو - تغییرمکان آزمایشگاهی با نتیجه‌ی آنالیز غیرخطی المان محدود در شکل ۶ نشان داده شده است. تطابق خوبی در مرحله رفت بارگذاری از نظر شکل سیکل‌های بارگذاری و شیب‌های مربوطه و همچنین اختلاف ناچیز در ظرفیت نهایی در دو حالت آزمایشگاهی و عددی وجود دارد که البته شیب منحنی‌ها در حالت عددی کمی بیشتر از حالت آزمایشگاهی است که علت آن این است که نرم‌افزارهای عددی بطور کامل نمی‌توانند ترک خوردگی و کاهش سختی مربوطه را بطور واقعی نشان دهند. منحنی‌های عددی در دو جهت رفت و برگشت یکسان و متقارن هستند ولی در واقعیت آزمایشگاهی بین ظرفیت در دو جهت به دلایل مختلف متفاوت است. نمونه‌های آزمایشگاهی دارای پینچینگ بیشتری و افت بیشتری بعد از نقطه ماکزیمم نسبت به نمونه‌های عددی هستند و علت آن هم عدم دقت زیاد نرم‌افزارهای عددی در تعریف بازشدگی ترک‌ها می‌باشد. با مقایسه‌ی بین دو منحنی شکل ۶، می‌توان از صحت نتیجه‌ی حاصل شده از آزمایش مطمئن بود. چرا که در بخش الاستیک، سختی ارتجاعی هر دو نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل المان محدود تقریباً برابر می‌باشند. همچنین میزان جذب انرژی و شکل پذیری هر دو نمونه نیز با هم برابر هستند. بنابراین بطور کلی تطابق خوبی بین دو منحنی آزمایشگاهی و عددی وجود دارد.



شکل ۶- منحنی‌های نیرو - تغییر مکان آزمايشگاهی و المان محدود نمونه بدون نوارهای پلیمری کربنی

۳- بررسی تاثیر پارامترهای موثر در مقاوم‌سازی

پس از اعتبار سنجی مدل عددی پیشنهادی و وجود تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی، مدل‌های جدید عددی در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرند که اسامی و مشخصات نمونه‌های مورد نظر در این تحقیق در جدول ۱ داده شده‌اند. در این مدل‌ها، قطر میلگردهای فولادی طولی، مقاومت فشاری بتن و همچنین تعداد نوارهای مدفون پلیمری کربنی متغیر می‌باشند. ستون مورد نظر در حالت چهار میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر دارای درصد آرماتور ۰/۷۹ درصد (کمتر از حد می‌نیمم ۱٪ آئین نامه) بوده و برای ستون‌های دارای میلگرد با قطر ۱۲ میلی‌متر این درصد سطح فولاد مقطع برابر ۱/۴۳ درصد (بیش از حداقل توصیه شده توسط آئین نامه‌های طراحی) است که پوشش بتن روی میلگرد در تمام حالت‌ها ۲۰ میلی‌متر است.

در جدول ۱، حرف C به منزله‌ی ستون و عدد 0 بیانگر عدم حضور نوارهای پلیمری برای تقویت ستون و علامت NSM نشان از بکارگیری روش نزدیک سطح با سه نوار پلیمری کربنی می‌باشند. عدد بعد از حرف C مبین قطر میلگرد طولی است.

جدول ۱: مشخصات مدل‌های عددی مورد بررسی

نام مدل	قطر میلگرد طولی (mm)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	تعداد نوارهای پلیمری کربنی
C10	10	13.21	0
C10-0	10	16.7	0
C10-NSM	10	16.7	3
C12-0	12	16.7	0
C12-NSM	12	16.7	3

برای مقایسه و بررسی تاثیر پارامترهای کلیدی، علاوه بر مقایسه کلی نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌های با یکدیگر، مقادیر ظرفیت نهایی و میزان جذب انرژی و مقدار شکل‌پذیری نمونه‌ها هم با یکدیگر مقایسه می‌شود. ظرفیت نهایی، ماکزیمم نیرویی است که در یکی از جهات بارگذاری توسط نمونه تحمل می‌گردد و با ادامه بارگذاری و افزایش تغییر مکان، شاهد افت نیرو تا مرحله شکست نهایی نمونه خواهیم بود.

همان‌طور که از شکل ۶ قابل مشاهده است، شیب اولیه خطی نمودار در مرحله ترک‌خوردگی و بار ترک‌خوردگی تغییر می‌کند و سپس بصورت غیرخطی تا مرحله جاری شدن میلگردهای طولی و در باری برابر P_y با تغییر مکان

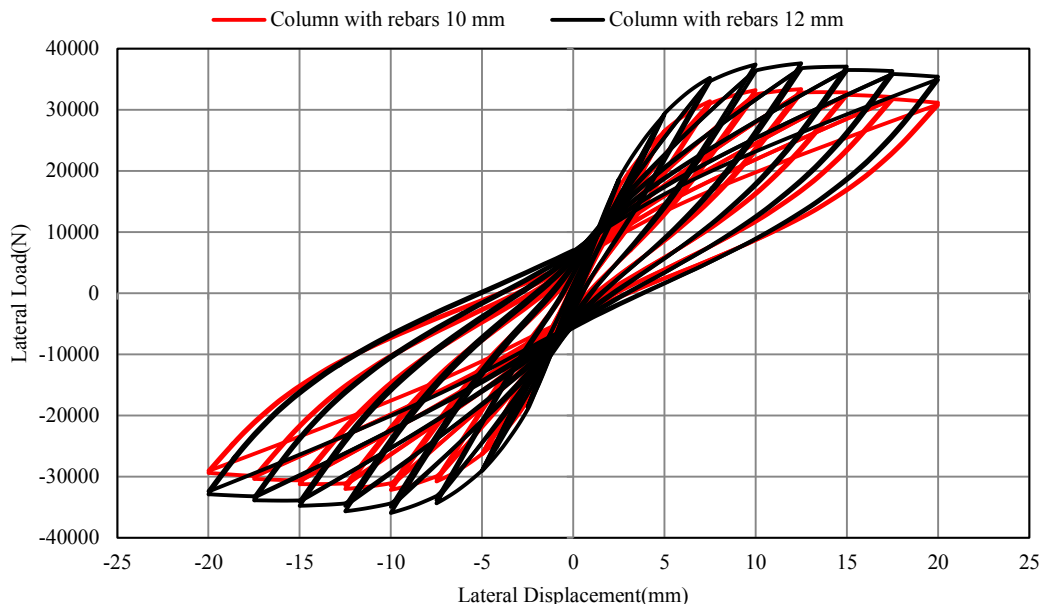
متناظر Δ_y تغییر جهت می دهد، پس از رسیدن نمونه به بار ماکزیمم و متعاقباً افت ظرفیت و لحظه شکست در تغییرمکان نهایی Δ_u اتفاق می افتد. شکل پذیری خمشی بصورت نسبت تغییرمکان جاری شدن به تغییرمکان نهایی بصورت $\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$ تعریف میگردد و چنانچه میزان افت بار بیش از ۱۵ درصد بار نهایی باشد، مقدار تغییر مکان نهایی در بار متناظر ۸۵٪ بار نهایی در نظر گرفته می شود [۱۵]. این عدد با توجه به وضعیت بتن فشاری از نظر میزان خردشدگی و کنده شدن بتن تعیین می شود و هر چه بتن از یکپارچگی و استحکام بیشتری برخوردار باشد، می توان از افت های بزرگ تری برای این منظور استفاده نمود. شکل پذیری خمشی بصورت نسبت تغییر مکان جاری شدن به تغییر مکان نهایی تعریف می گردد و چنانچه میزان افت بار بیش از ۱۵ درصد بار نهایی باشد، مقدار تغییر مکان نهایی در بار متناظر ۸۵٪ بار نهایی در نظر گرفته می شود. این عدد با توجه به وضعیت بتن فشاری از نظر میزان خردشدگی و کنده شدن بتن تعیین می شود و هر چه بتن از یکپارچگی و استحکام بیشتری برخوردار باشد، می توان از افت های بزرگ تری برای این منظور استفاده نمود. میزان جذب انرژی هر نمونه برابر سطح زیر منحنی بار-تغییرمکان تا نقطه شکست نمونه می باشد که قدرت استهلاک انرژی توسط هر نمونه را نشان می دهد و در اینجا چون بارها بصورت رفت و برگشتی وارد می شوند و سیکل های مختلف بوجود می آیند انرژی جذب شده بصورت تجمعی محاسبه می گردد و برابر سطح زیر منحنی بار-تغییرمکان سیکل های مختلف تا مرحله شکست نهایی می باشد. در جدول ۲ مقادیر ظرفیت نهایی، شکل پذیری و میزان جذب انرژی تجمعی همه نمونه های مورد بررسی داده شده اند. میزان جذب انرژی نمونه آزمایشگاهی بدون تقویت با روش سطح نزدیک برابر با ۲۰۱۳۰۰۰ نیوتن میلیمتر بود که در نمونه با مدل سازی عددی این مقدار به ۲۰۰۷۰۰ نیوتن میلیمتر رسید و این بیانگر دقت بالا در مدل سازی نمونه می باشد.

جدول ۲: مقادیر جذب انرژی، شکل پذیری و ظرفیت نهایی نمونه ها

نام نمونه	ظرفیت باربری حداکثر (نیوتن)	درصد افزایش ظرفیت نسبت به نمونه C10	جذب انرژی (ژول)	درصد افزایش جذب انرژی نسبت به نمونه C10	شکل پذیری	درصد افزایش شکل پذیری
C10	۲۶۱۷۵	--	۱۸۰۲۱۰۰	--	۴	--
C10-0	۳۱۹۴۵	۲۲	۲۰۰۷۰۰	۱۱	۴	۰
C10-NSM	۳۷۹۶۴	۴۵	۳۳۰۲۶۰۰	۸۳	۴/۸	۲۰
C12-0	۳۶۰۱۰	۳۸	۲۵۵۲۰۰۰	۴۲	۴/۲	۵
C12-NSM	۵۳۰۷۶	۱۰۳	۳۴۳۶۰۰۰	۹۱	۴/۸	۲۰

۳-۱- تاثیر قطر میلگرد طولی

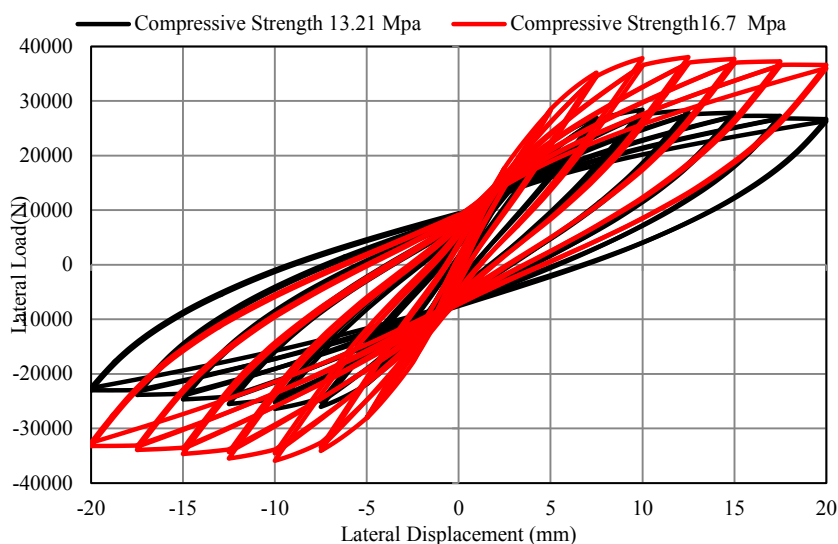
مقایسه بین نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه های تقویت نشده C10-0 و C12-0 با میلگردهای قطر ۱۰ و ۱۲ میلیمتر در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود روند افزایش ظرفیت و سیکل های چرخشی و شیب ها در هر دو نمونه تقریباً مشابه است. با تغییر نمره ی میلگرد از ۱۰ میلیمتر به ۱۲ میلیمتر با حفظ تعداد ثابت می توان شاهد افزایش کمی در ظرفیت باربری حدود ۱۳ درصد بود. میزان جذب انرژی در حالت نمونه بدون تقویت با قطر ۱۰ میلیمتر برابر ۲۰۰۷۰۰ نیوتن میلیمتر بود در حالیکه این مقدار در نمونه مشابه با قطر ۱۲ میلیمتر به میزان ۲۸ درصد افزایش یافت و مقدار شکل پذیری نیز به میزان ۵ درصد افزایش یافت. بنابراین افزایش قطر میلگرد دارای تاثیر قابل توجه در افزایش انرژی جذب شده داشت.



شکل ۷ - منحنی های نیرو - تغییر مکان ستون با دو نوع میلگرد بدون نوارهای پلیمری کربنی

۲-۳- تاثیر مقاومت فشاری بتن

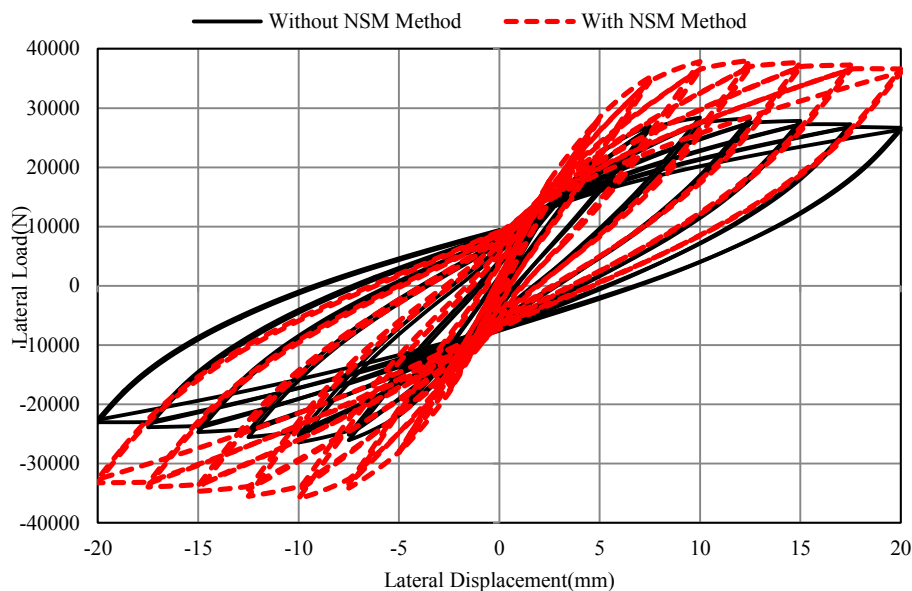
تاثیر پارامتر مقاومت فشاری بتن ستون بتنی آرمه با مقایسه دو نمونه C10 و C10-0 با مقاومت های ۱۶/۷ و ۱۳/۲ مگاپاسکال بررسی شد بطوریکه مقاومت بتن به میزان حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است ولی تعداد و قطر میلگردهای برابر ۱۰ میلیمتر مشابه در دو نمونه بود و از روش نزدیک سطح هم استفاده نشده است. نمودارهای بار-تغییر مکان دو نمونه با شرایط یکسان ولی مقاومت های متفاوت بتن بدون استفاده از روش مقاوم سازی در شکل ۸ نشان داده شده است. مقایسه نمودارها نشان می دهد که نمونه C10 با مقاومت فشاری کمتر دارای شیب کمتر بوده و نرم تر می باشد و دارای پینچینگ بیشتر بدلیل ضعیف تر بودن بتن است. مقاومت فشاری حدودا ۲۰ درصد کاهش یافته و به همان نسبت ظرفیت نهایی ستون بتنی هم حدودا ۱۸ درصد کاهش می یابد در حالی که میزان جذب انرژی به مقدار ۱۰ درصد کاهش می یابد و تغییر چندانی در میزان شکل پذیری نیز مشاهده نشد.



شکل ۸- مقایسه ی یک نمونه با دو نوع مقاومت فشاری بتن و درصد میلگرد یکسان بدون استفاده از روش نزدیک سطح

۳-۳- تاثیر بکارگیری نوارهای CFRP

دو نمونه C10-NSM و C12-NSM از مدل های عددی با سه نوار پلیمری کربنی با روش نزدیک سطح با میلگردهای طولی داخلی فولادی با قطر ۱۰ و ۱۲ میلیمتر تقویت شده و بطور جداگانه تحت بارگذاری محوری ثابت فشاری و جانبی رفت و برگشتی افزایشده قرار گرفتند. نوارهای پلیمری کربنی دارای ضخامت ورق ۱/۴۵ میلیمتر، عرض ۹/۵۹ میلیمتر با مدول الاستیسیته ۱۵۹۰۰۰ مگاپاسکال و تنش کششی ۱۷۴۱ مگاپاسکال می باشند. نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه C10-0 تقویت نشده و نمونه C10-NSM تقویت شده با روش نزدیک سطح با میلگردهای طولی با قطرهای یکسان ۱۰ میلیمتر و مقاومت های مشابه بتن در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق نمودارهای شکل ۹، مقاوم سازی ستون با میلگردهای ۱۰ میلیمتری با روش نزدیک سطح باعث افزایش ۱۹ درصدی ظرفیت ستون می گردد. با اضافه نمودن لایه های نوار پلیمری بر سطوح ستون بتنی، این سطوح در معرض بارهای رفت و برگشتی به طور متناوب تحت فشار و کشش قرار می گیرند. به دلیل حضور نوارهای پلیمری که خود دارای مقاومت کششی بسیار بالایی هستند، از شکست بتن در وجه خارجی ستون بتنی جلوگیری کرده و امکان ایجاد ترک را به تاخیر می اندازد. این امر، باعث بالا رفتن ظرفیت باربری جانبی المان مورد بررسی می شود. به عبارتی، در حالت بدون مقاوم سازی، مکانیسم تخریب یا قلوه کن شدن بتن در وجه خارجی ستون بتنی زودتر اتفاق می افتد.



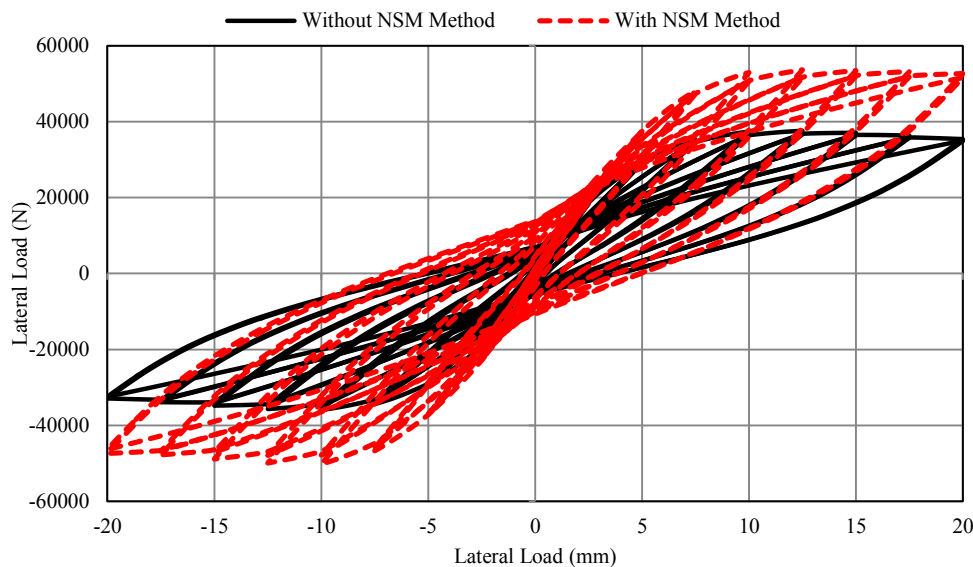
شکل ۹- مقایسه‌ی ستون بدون مقاوم‌سازی و مقاوم‌سازی دارای میلگرد با قطر ۱۰ میلیمتر با روش نزدیک سطح

در حالت مقاوم‌سازی ستون با روش نزدیک سطح، ابتدا نوارهای پلیمری به کشش می افتند و سپس دو حالت اتفاق رخ می دهد؛ یا نوار از سطح بتن جدا می شود^۴ یا اگر چسب بین نوار و سطح بتن دارای مقاومت برشی بالایی باشد، نوار پاره می شود و سپس مکانیسم تخریب بتن اتفاق می افتد. این موضوع خود می تواند به عنوان یک روش مناسب برای سازه های در معرض انهدام پیشرونده و یک سیستم مناسبی دفاعی برای سازه های حساس مورد استفاده قرار گیرد.

نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه C12-0 تقویت نشده و نمونه C12-NSM تقویت شده با روش نزدیک سطح با میلگردهای طولی با قطرهای یکسان ۱۲ میلیمتر و مقاومت های مشابه بتن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

^۴ delamination

مقاوم‌سازی ستون با میلگردهای ۱۲ میلیمتری با روش نزدیک سطح باعث افزایش قابل توجه ۴۷ درصدی ظرفیت ستون می‌گردد.



شکل ۱۰- نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌ی بتنی با میلگرد ۱۲ میلیمتر در دو حالت بدون و با روش نزدیک سطح

شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده از ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش یافته و این افزایش در نمونه‌های ضعیف‌تر با میلگردهای قطر کمتر، بیشتر می‌باشد ضمن اینکه نصب نوارهای پلیمری کربنی باعث افزایش سختی نمونه می‌شود و طبیعتاً شکل‌پذیری نسبت به نمونه‌های تقویت شده با روش‌های دیگر افزایش کمتری خواهد داشت. همان‌طور که از نتایج مشخص است، استفاده از روش مقاوم‌سازی نزدیک سطح باعث افزایش میزان جذب انرژی و ظرفیت عضو می‌شود. مقدار جذب انرژی در حالت بدون استفاده از روش نزدیک سطح و استفاده از میلگردهای با قطر ۱۲ میلیمتر برابر با ۲۵۵۲۰۰۰ نیوتن میلیمتر و در حالت استفاده از روش نزدیک سطح برابر ۳۴۳۶۰۰۰ نیوتن میلیمتر شده است. به عبارت دیگر میزان جذب انرژی در حالت استفاده از میلگرد ۱۲ میلیمتر ۳۵ درصد بود و در حالی که با بکار بردن میلگرد با قطر ۱۰ میلیمتر، میزان جذب انرژی تا ۶۵ درصد رشد داشته است.

مقایسه نتایج مقاوم‌سازی نمونه‌ها با روش نزدیک سطح با میلگردهای داخلی طولی با قطرهای متفاوت نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت در ستون‌های با میلگردهای ۱۰ و ۱۲ میلیمتر برابر ۱۹ و ۴۷ درصد بود لذا ظرفیت ستون تقویت شده با میلگرد ۱۲ میلیمتری بیش از ۲۸ درصد نسبت به ستون با قطر ۱۰ میلیمتر افزایش یافت، در حالی که میزان افزایش در شکل‌پذیری و جذب انرژی در نمونه با میلگرد قطر ۱۰ میلیمتری بیش از نمونه با قطر ۱۲ میلیمتر بود. لذا شکل‌پذیری و جذب انرژی نمونه تقویت شده با میلگرد طولی ۱۰ میلیمتر نسبت به نمونه مشابه با میلگرد با قطر ۱۲ میلیمتر به ترتیب به میزان ۵ درصد و ۳۰ درصد افزایش داشته است.

بنابراین این امر نشان دهنده‌ی آن است که زمانی‌که زمانی‌المان مورد نظر دارای ظرفیت باربری کم، نقص در اجرا مانند اشتباه در نوع میلگردگذاری یا حتی مقاومت فشاری بتن باشد روش تقویت نزدیک سطح می‌تواند سودمند و مفید واقع گردد. اما برای مقاطع حجیم‌تر و میلگردهای با قطر بزرگ‌تر مانند حالت قبلی تاثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد.

۴- مطالعه تحلیلی

ظرفیت خمشی تئوری ستون تقویت شده به روش نزدیک سطح براساس سازگاری کرنش و تعادل نیروهای داخلی قابل تعیین است. در شکل (۱۱)، فرضیات برای شرایط مطالعه تحلیلی کرنش و تنش داخلی برای ستون تقویت شده نشان داده شده است. روش طراحی در مقاوم‌سازی براساس روش تکرار و سعی و خطا در جایی که کرنش بتن

به حد تسلیم برسد و عمق تار خنثی نیز با روش سعی و خطا تعیین شود. از شکل (۱۱) می‌توان فرض نمود که کرنش به صورت خطی در مقطع تغییر می‌کند؛ مقطع در ابتدا بدون ترک خوردگی است؛ چسبندگی و پیوستگی کامل بین نوارهای پلیمری و بتن وجود دارد: کرنش فشاری بتن برابر با 0.03 فرض می‌شود؛ رابطه‌ی تنش-کرنش بتن براساس منحنی ارائه شده توسط تودچینی [۱۶] تعریف می‌شود؛ رفتار تنش-کرنش نوارهای پلیمری کربنی به صورت الاستیک در نظر گرفته می‌شود و رفتار اعضای فولادی به صورت الاستو-پلاستیک می‌باشند. فرایند روش تحلیلی جهت تعیین ظرفیت خمشی در ادامه به صورت خلاصه آمده است.

(۱) فرض می‌شود که کرنش بتن به حد تسلیم خود برسد و عمق تار خنثی نیز انتخاب می‌شود.

(۲) پارامترهایی که در تعریف بلوک تنش مورد استفاده قرار می‌گیرند به شرح ذیل هستند.

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2} \quad (2)$$

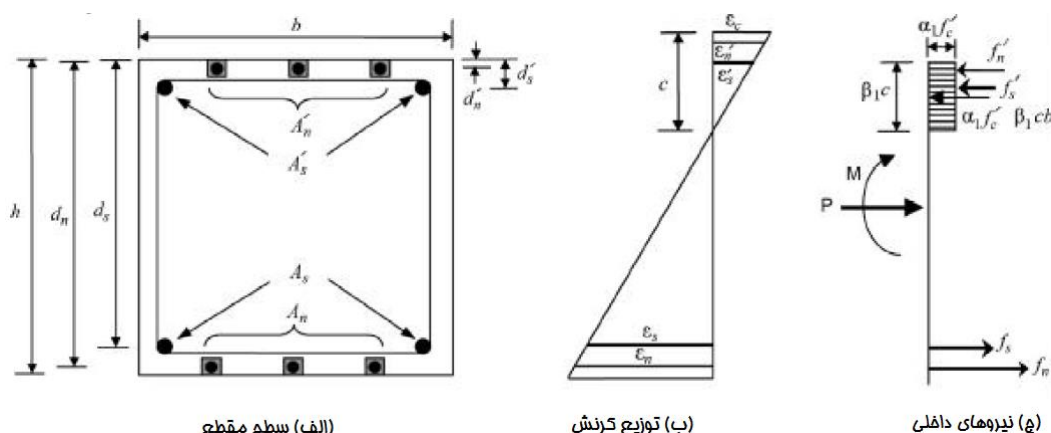
$$\varepsilon'_c = \frac{1.71f'_c}{E_c} \quad (3)$$

(۳) کرنش فولاد و نوارهای پلیمری مسلح کننده با روش سازگاری تعیین می‌شوند. تنش فولاد و نوارهای پلیمری مسلح کننده با قانون‌های مدل رفتاری مصالح تعیین می‌شوند.

(۴) عمق تار خنثی با روش تعادل و محاسبه نمودن بار محوری تعیین می‌شود.

(۵) اگر مقدار تار خنثی محاسبه شده با فرض اولیه یکسان نباشد، مقدار دیگری فرض شده و فراین دوباره تکرار می‌شود تا این دو مقدار به یکدیگر نزدیک شوند. ظرفیت خمشی با استفاده از رابطه‌ی (۴) قابل محاسبه است.

$$M = \alpha_1 f'_c \beta_1 c b \left(\frac{h}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + A_s' f_s' \left(\frac{h}{2} - d_s' \right) + A_s f_s \left(d_s - \frac{h}{2} \right) + A_n' f_n' \left(\frac{h}{2} - d_n' \right) + A_n f_n \left(d_n - \frac{h}{2} \right) \quad (4)$$



شکل ۱۱- شرایط تنش و کرنش در مقطع ستون بتن مسلح شده با روش نزدیک سطح

یک برنامه‌ی کامپیوتری در محیط ماکرو برنامه‌ی اکسل جهت تحلیل مقطع تقویت شده نوشته و اجرا شد. سطح مقطع و مشخصات مکانیکی بتن، فولاد و نوارهای پلیمری کربنی به عنوان ورودی‌های این برنامه بودند. مقادیر نتایج مدل عددی و تحلیلی در جدول (۳) ارائه شده است. از جدول می‌توان دریافت که تحلیل پیشنهاد شده، پیش‌بینی قابل قبولی از ظرفیت خمشی ستون تقویت شده به دست می‌دهد. مقادیر لنگر خمشی در مدل عددی از ضرب مقدار نیروی جانبی در ارتفاع ستون و نیروی ثقلی بالای ستون به همراه تغییر مکان جانبی اعمالی به دست می‌آید.

این لنگر، در محل پای ستون استخراج شده است. تمام مقاومت‌های خمشی اندازه‌گیری شده در حد ۵٪ خطا داشتند که نشان از قابلیت و توانایی تحلیلی ارائه شده در محاسبه‌ی ظرفیت خمشی ستون‌های بتن مسلح با روش نزدیک سطح می‌دهد.

جدول ۳: مقایسه بین مقادیر مدل‌های عددی و تحلیلی

خطا (%)	لنگر خمشی مدل تحلیلی (نیوتن-متر)	لنگر خمشی مدل عددی (نیوتن-متر)	نام نمونه
۴/۸	۳۱۰۱۰	۲۹۵۷۶	C10
۴/۷	۳۵۶۷۲	۳۴۰۶۸	C10-0
۵/۲	۴۲۰۸۷	۴۰۰۰۸	C10-NSM
۴/۹	۴۱۱۰۰	۳۹۱۶۸	C12-0
۵	۵۹۲۱۰	۵۶۳۹۱	C12-NSM

۵- نتیجه‌گیری

پس از مدل‌سازی عددی ستون بتن آرمه تقویت شده با نوارهای پلیمری کربنی تقویت شده با روش نزدیک سطح در نرم‌افزار اپنسیس و اعتبار سنجی با نتایج آزمایشگاهی با تطابق نسبتاً خوب، نمونه‌های جدید عددی با متغیرهای متفاوت تحت بارهای ثابت محوری فشاری و بار جانبی افزایش یافته رفت و برگشتی آنالیز شدند که نتایج زیر حاصل گردید:

- مقایسه نتایج روش المان محدود دقیق جهت بررسی رفتار ستون بتن مسلح و مقاوم‌سازی شده با روش نزدیک سطح با نتایج تجربی آزمایشگاهی نشان از تطابق قابل قبول بود و ابزار مناسبی جهت تحلیل و بررسی این نوع از سازه‌ها باشد.

- نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهند که روش مقاوم‌سازی پیشنهادی نزدیک سطح با افزایش ظرفیت باربری از خسارت کششی (ترک خوردن و افت ظرفیت) ستون‌های بتنی در خمش (نسبت به نمونه‌ی مینا) جلوگیری می‌کند و مقدار شکل‌پذیری و جذب انرژی در نمونه‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از روش نزدیک سطح با درصدهای متفاوت افزایش می‌یابد.

- مقدار تقویت نوارهای پلیمری کربنی برای همه ستون‌ها یکسان بود و در همه حالات باعث افزایش ظرفیت شد، ولی نمونه‌هایی که درصد میلگردهای طولی بیشتری داشت، افزایش ظرفیت خمشی بیشتری تا حدود ۲۸ درصد نسبت به نمونه با درصد میلگرد طولی کمتر از حداقل پیشنهادی آئین نامه‌های طراحی بود.

- مقایسه ستون‌های تقویت شده با نوارهای پلیمری کربنی در روش نزدیک سطح نشان داد که ستون‌هایی که دارای درصد میلگرد طولی کمتر بودند دارای ۵ درصد افزایش در شکل‌پذیری و حدود ۳۰ درصد افزایش در جذب انرژی تجمعی نسبت به ستون‌ها با درصد آرماتور طولی بیشتر بودند.

- کاهش مقاومت بتن ستون‌ها تا ۲۰ درصد باعث کاهش ۱۸ و ۱۰ درصدی ظرفیت و جذب انرژی شده و میزان پینچینگ در رفتار بارگذاری رفت و برگشتی این نمونه هم افزایش می‌یابد.

- افزایش ۷۵ درصدی میلگردهای طولی باعث افزایش تنها ۱۳، ۲۸ و ۵ درصدی در ظرفیت، جذب انرژی و شکل‌پذیری شد که یکی از علل افزایش کمتر می‌تواند کم بودن درصد میلگرد نمونه ضعیف کمتر از حداقل آئین نامه باشد.

1. FIB. (2001). *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Bulletin 14. Lausanne. p. 138.*
2. ACI. (2002). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American concrete institute (Committee 440); p. 118.*
3. Warren, G. E. (1998). *Waterfront repair and upgrade, Advanced Technology Demonstration Site No. 2: Pier 12, NAVSTA San Diego, Site Specific Report SSR-2419-SHR, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, CA.*
4. Nordin, H. , Täljsten, B. “Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 10, no. 1, pp. 60–68, 2006.
5. Ordin, H., Täljsten, B. , Carolin, A. (2001). “Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted reinforcement (NSMR)”, *Proceedings, International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Volume 2, Teng J.-G. (Ed). ISBN: 0-08-043945-4, (2001), pp. 1067–1075.*
6. Olivova, K., Bilcik, J., “Strengthening of concrete columns with CFRP”. *Slovak Journal of Civil Engineering 2009: 1-9.*
7. Yu, B., Kodur, V.K.R., “Effect of Temperature on Strength and Stiffness Properties of NSM FRP Reinforcement”. *Composites part B 2014; 58: 510-17.*
8. Chellapandian, M., Suriya Prakash, S., Sharma, A., “Strength and Ductility of Innovative Hybrid NSM Reinforced and FRP Confined Short RC Columns under Axial Compression”, *Composite Structures (2017).*
9. Jiang, Sh., Zeng, X., Shen, Sh., Xu, X., “Experimental studies on the seismic behavior of earthquake-damaged circular bridge columns repaired by using combination of near-surface-mounted BFRP bars with external BFRP sheets jacketing”, *Engineering Structures, Volume 106, 1 January 2016, Pages 317-331.*
10. Bournas, D., and Triantafillou, T. (2009). “Strengthening of reinforced concrete columns with near-surface-mounted FRP or stainless steel.” *ACI Struct. J.*, 106(4), 495–505.
11. Barros ,J.A.O., Varma, R.K.J., Sena-Cruz, M. , Azevedo, A.F.M., (2008). “Near surface mounted CFRP strips for the flexural strengthening of RC columns: Experimental and numerical research”. *Engineering Structures, Volume 30, Issue 12, December 2008, Pages 3412-3425.*
12. Barros JAO, Dias SJE. (2006). “Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams”, *J Cem Concr Compos ;28(3):27692.*
13. Mazzolini, S., McKenna, F., Scott, M. H., and Fenves, G. L. (2006). “Open system for earthquake engineering simulation, user command-language manual, Version 2.4.4.” *Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, CA.*
14. Menegotto M., Pinto P.E. (1973), “Method of anaysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending”, *IABSE Symposium of Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads, International Association of Bridge and Structural Engineering, Libson, Portugal, Vol. 13: 15-22.*
15. Designers’ 2005 Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures. General Rules and Rules for Buildings and Structural Fire Design. A. W. Beeby and R. S. Narayanan. 0 7277 3105 X. Published.*
16. Todeschini, C., Bianchini, A.C., and Kesler, C.E. (1964). “Behavior of Concrete Columns Reinforced with Strength Steels”, *ACI Journal, Proceedings, 61(6), 701-716.*

Investigation of effectiveness of key parameters on seismic performance RC columns strengthened with near surface mounted (NSM) method

Mohammad Kazem Sharbatdar

Associate Professor, Semnan University/ Faculty of Civil Engineering

Mehdi Alizade

Ph.D Candidate, Semnan University/ Faculty of Civil Engineering

Abstract:

In this paper, a strengthening method based on embedded carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips in near surface on concrete cover was applied for improving flexural capacity of reinforced concrete columns with low strength compressive concrete subjected lateral cyclic loads. The debonding phenomena is prevented in this suggested method and the strip capacity is completely used and there is more protection against fire. In order to investigate the flexural behavior of near surface mounted (NSM) strengthened RC columns, a finite element method is used. poly-linear behavior of concrete and steel was used. There was good similarity between finite element and experimental results that indicates suggested model was calibrated. The new models consisting of different variables such as embedded steel bar diameter, concrete strength, and the numbers of CFRP strips were considered. The test results show that by using the NSM technique, the flexural strength and lateral load capacity of the columns increase significantly. The numerical results were also compared with the results obtained from the analytical study that was conducted based on strain compatibility. A good agreement between analytical and experimental results was observed.

Keywords: NSM method, Reinforced concrete column, Carbon fiber reinforced polymer, Flexural capacity